

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210876

基于多波长协作的切削液残留表面激光 位移测量误差补偿方法*

陈旭辉^{1,2,3,4}, 李兴强^{1,2,4}, 崔昊^{1,2,3,4}, 杜劲松^{1,2,4}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究 沈阳 110169;
3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 辽宁省智能检测与装备技术重点实验室 沈阳 110179)

摘要:在加工测量一体化过程中,工件表面切削液残留形成的油膜会严重影响光学在机测量的精度。现有的误差补偿方法通常需要获取油膜介质的先验信息,如成分、厚度等。而这些信息受加工形质、切削液随机分布等因素的影响难以实时获取。为此,本文提出一种基于多波长协作的切削液残留表面激光位移测量误差补偿方法。首先设计并搭建了基于激光三角位移测量的多波长激光测量系统,可利用多波长激光测量同一被测点位移。通过引入柯西色散规律,建立光学系统与激光波长的解析关系,并基于此推导出多波长激光测量内在的差分特性,最终实现误差补偿。本文依此方法进行了实验。结果表明补偿后测量误差绝对值小于0.01 mm,与未补偿的测量数据对比,误差降低了至少92%。

关键词:多波长协作;激光三角法;切削液残留;在机测量

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460

Displacement error compensation method of laser measurement for surface with cutting fluid residue based on multi wavelength cooperation

Chen Xuhui^{1,2,3,4}, Li Xingqiang^{1,2,4}, Cui Hao^{1,2,3,4}, Du Jinsong^{1,2,4}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory on Intelligent Detection and Equipment Technology of Liaoning Province, Shenyang 110179, China)

Abstract: In the process of integration of processing and measurement, the optical on-machine measurement accuracy is seriously affected by the oil film formed by cutting fluid remaining on workpiece surface. The existing error compensation methods generally require the prior information of the oil film, such as composition, thickness, etc. Nevertheless, this information is hard to obtain in real time due to factors of processing and random distribution of cutting fluid. For these reasons, a displacement error compensation method for surfaces with cutting fluid adhesion based on multi wavelength laser is proposed in this article. First, a multi wavelength laser measurement system is designed and set up based on laser triangulation, which can measure the displacement of the same measured point by using multi wavelength laser. Then, the Cauchy dispersion law is introduced to establish the analytical relation between the optical system and the laser wavelength. Next, the inherent difference property of multi wavelength laser measurement is deduced, and the error compensation is realized. Experiments are performed according to the method in this article. The experimental results show that the absolute value of measurement error after compensation is less than 0.01 mm. Compared with the uncompensated measurement data, the error is reduced by at least 92%.

Keywords: multi wavelength collaboration; laser triangulation; cutting fluid residue; on machine measurement

0 引言

随着高端装备制造业的快速发展,相关测量技术也在不断进步。在机测量具有加工测量一体化的显著优势,能够大幅提高生产效率、降低废品率、节约制造时间和成本。由于具有柔性非接触、测量精度高、检测速度快等特点,近年来光学在机测量技术得到广泛关注^[1-3]。然而,受到加工现场复杂环境,如被加工物料形状各异、材料不一、表面切削液残留不均^[4-5]等不利因素的影响,光学测量系统的优势并未得到充分发挥,最终测量精度严重受限。

在加工测量一体化过程中,工件表面切削液残留形成的油膜会严重影响光学在机测量的精度,因此亟需相应的误差补偿方法。Wu等^[6]搭建了激光三角测量系统,根据光的折射特性建立误差补偿模型,但该方法需在测前获取油膜的先验信息,如油膜厚度、光在油膜中的折射率等。然而,在复杂的现场加工条件下,上述信息很难实时获取。针对油膜厚度测量,目前最常用的方法是光谱分析法。蔡宗岐等^[7]依据油膜拉曼光谱的“指纹性”,分析了不同油品、不同厚度的激光拉曼光谱特征,进而实现了油膜厚度检测;崔永强等^[8-9]利用激光诱导荧光技术,先后提出了波段比值法和光谱信号反演法,实现了较厚油膜的测量;陈博雯等^[10]分析了测量位姿对荧光油膜测厚精度的影响,进一步确保了膜厚测量精度;Saleh等^[11]利用介质对光的吸收特性,设计了基于LED光谱的浮标型油膜厚度检测装置。上述方法在油膜厚度测量方面均取得一定成果,但大多针对海面溢油环境下的油膜检测,适用于“油膜-水层”结构,而对于附着在工件外表面的油膜厚度检测难以适用。除利用光谱分析实现膜厚测量外,也有学者针对透明材料厚度提出基于激光三角的测量方法,其原理与工件表面油膜厚度测量类似。如杨桂栓等^[12]对激光折射进行补偿,实现透明平板的厚度测量;刘凯媚等^[13]基于激光三角法,实现了可自适应位移变化的玻璃厚度测量,解决了测量位置变化后需要重复标定的问题。总体上看,激光三角法能够实现对透明物质厚度的直接测量,但仍需获取相关材料对光的折射率信息。然而,不同加工状态下的切削液的成分不同、性质各异,因而残留切削液对光学测量的实质影响具有不确定性。若新增检测设备获取被测目标的先验信息,不仅使测量系统复杂化,同时也会降低测量效率,不适用于在机测量环境。

上述方法虽存在固有局限,但仍具有各自的优势。其中光谱分析法通过利用多波长激光,根据不同波长光之间的差异规律反映出被测物自身性质;激光三角法通过几何光路,利用光学系统的传播光路解析求解出被测

物厚度信息。若能够综合发挥二者优势,将为实现未知油膜厚度测量提供可行的解决方案。值得一提的是,随着激光测量技术的不断发展,光谱共聚焦测量技术日益成熟^[14-16],其原理主要是利用复色光源来实现多波长激光测量。大量研究表明共聚焦测量具有良好的轴向层析能力和分辨力^[17-19],这为本文实现未知切削液油膜附着条件下的工件表面测量提供了有利参考。

基于上述分析,本文提出一种基于多波长激光协作的切削液残留表面测量误差补偿方法,旨在无需获取工件表面残留切削液的先验信息,如成分、厚度等,亦可实现测量误差补偿。本文首先,基于激光三角测量原理,设计了多波长激光三角在机测量系统,该系统可利用多波长激光测量同一被测点的位移信息。其次,建立了基于多波长激光的激光三角测量模型,根据不同波长光传播路径的差分规律,结合柯西色散规律,阐明切削液表面残留导致的测量误差的自适应补偿方法。随后,利用MATLAB仿真分析多波长协作的激光测量误差与油膜性质之间的内在关联。最后,搭建了实验平台,完成了测量系统标定,并在切削液先验信息未知的条件下进行测量实验。实验结果证明了方法的有效性。

1 激光三角测量系统

1.1 激光三角测量原理

近年来,光学测量方法因具有高精度、快响应、非接触等优势,已广泛应用于汽车船舶、航空航天等诸多领域^[20]。其中,激光三角法因具有结构简单、检测速度快、测量精度高等显著优势^[21-22],在工程实践中广泛应用。激光三角测量法的基本原理如图1所示。激光发射器通过透镜发射出一条准直激光,激光照射到平面后发生漫反射,反射光线经过聚集透镜聚焦后,在电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)上形成光斑。此时,给定一参考平面,当激光照射于参考平面时,记反射光线(图1中虚线所示)与入射光线夹角为 α ,反射光线与CCD平面夹角为 β ,激光照射点与透镜中心间距为 l ,激光光斑中心与透镜中心间距为 l' 。上述4个参数即为传感器内部参数。为确保光斑清晰,各参数之间需满足Scheimpflug条件:

$$l \tan \alpha = l' \tan \beta \quad (1)$$

在实际测量过程中,当被测物体表面与参考平面之间存在位移 Δx 时,CCD上成像光斑中心的位置也相应偏移 Δy ,根据几何关系可知二者满足:

$$\Delta x = \frac{l \Delta y \sin \beta}{l' \sin \alpha - \Delta y \sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

考虑到传感器结构参数远大于传感器量程,即 $l' \gg \Delta y$,结合式(2)可得物面位移 Δx 与光斑像移 Δy 的

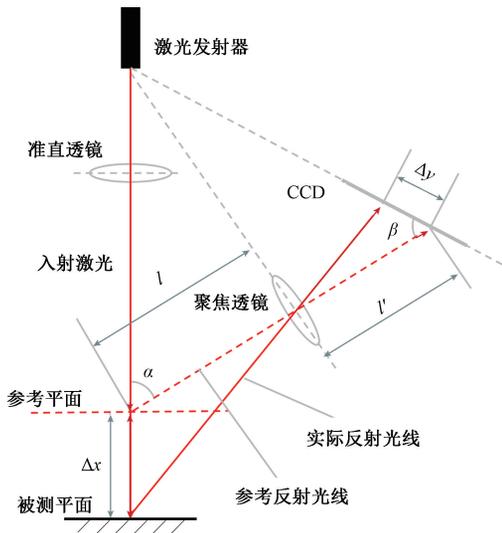


图 1 激光三角测量原理

Fig. 1 Measurement principle of laser triangulation

近似线性关系^[23]:

$$\Delta x = \frac{l \sin \beta}{l' \sin \alpha} \Delta y \quad (3)$$

1.2 基于多波长协作的激光三角测量系统

如图 2 所示, 基于多波长协作的激光三角测量系统由多波长激光光源、自研发的激光三角测量系统 (laser triangulation measurement system, LTMS)、三维位移台、待测工件、固定支架及其他辅助装置组成。

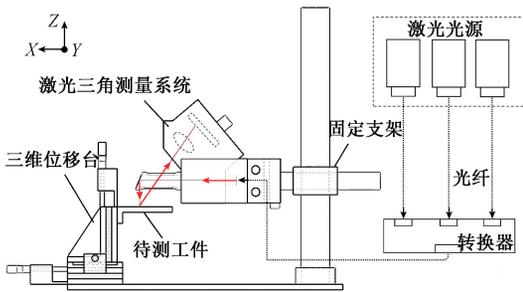


图 2 多波长协作的激光三角测量系统模型

Fig. 2 Model of laser triangulation system based on multi wavelength cooperation

考虑到本文旨在通过多波长激光协作实现切削液附着表面测量, 为体现多波长激光测量的差分规律, 至少需要 3 种不同波段的激光, 而为使不同波长激光的测量结果具有明显的差分特性, 同时便于实验观察, 本文在可见光波段 (400~760 nm) 选择红 (635 nm)、绿 (520 nm)、紫 (405 nm) 三色光作为激光光源; 自主研发的激光测量系统主要由光学透镜组、CCD 及数据处理模块等部分组成。其与固定支架固联, 使其相对于底面基座固定。测量时, 通过调节位移台 Z 向位移, 即可改变实际的测量距离; 三

维位移台、固定支架及其他辅助装置固定于底面基座; 待测工件固定在与位移台的竖向平面 (YOZ) 平行的平面上, 使被测面与水平面 (XOY) 平行; 利用专用滴管向被测位置滴加未知成分和厚度的切削液, 即可模拟切削液附着条件下的测量环境。

值得一提的是, 本文激光光源的传导是采用光纤方式实现的。测量系统实际工作时, 激光通过光纤传导至自主研发的 LTMS。其优势在于: 仅需切换不同的光纤传输通道, 无需频繁更换不同型号的商品化传感器, 即可快速获取多波长激光在同一被测位置的测量信息, 避免了反复装调引发的系统误差和精度损失。

2 基于多波长协作的切削液残留表面测量误差补偿模型

2.1 切削液附着条件下的多波长协作测量原理

理想测量环境下, 激光三角法在一定量程范围内符合式 (3) 表述的线性规律。当待测表面存在切削液残留时, 光的折射将成为影响测量精度的关键因素, 此时多波长协作测量模型如图 3 所示。入射激光照射在物体表面上的 P 点, 理想条件下, 光线会沿直线反射到 CCD 上, 光斑中心落在 Q 点。而实际的反射光线将在切削液油膜与空气交界处发生折射, 且不同波长光线的折射率不同, 使得光斑中心偏离 Q 点的程度也不同, 落在 $Q_i (i = 1, 2, 3)$ 点处。将折射后的光线反向延长, 分别与入射光线相交于 $P_i (i = 1, 2, 3)$ 点, 则此时测量误差即为 P 与 $P_i (i = 1, 2, 3)$ 之间的距离。由此, 多波长协作测量的差分特性得以体现, 而在这一特性中隐含着激光波长与油膜性质、厚度参数的内在关联。

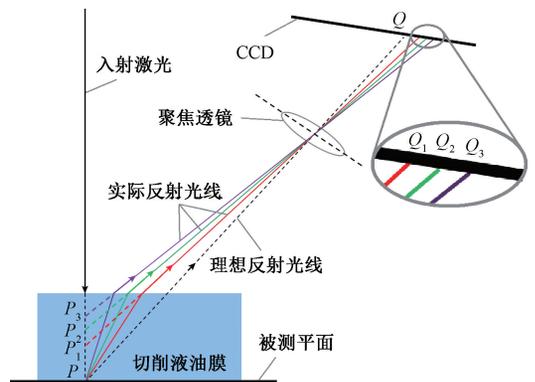


图 3 切削液油膜附着条件下的测量模型

Fig. 3 Measurement model of cutting fluid film adhesion

下文详细介绍基于多波长协作的测量模型, 并给出相应的求解过程。为表述清晰, 以聚焦透镜为界, 将测量模型分为两个区域论述。

2.2 切削液附着条件下的多波长协作测量模型

首先分析聚焦透镜之上,即 LTMS 内部的测量模型,如图 4 所示。将反射光线与竖直方向和水平方向的夹角分别记作 θ_i 和 $\varphi_i (i = 1, 2, 3)$, 显然有:

$$\theta_i + \varphi_i = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

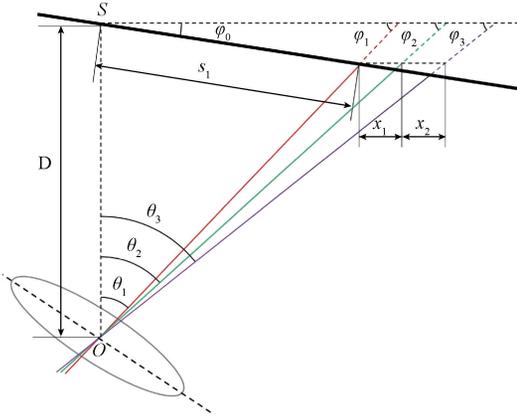


图 4 LTMS 内部的测量模型

Fig. 4 Measurement model inside the LTMS

由聚焦透镜中心 O 点向上引出辅助线,与 CCD 平面交于 S 点,两点间隔为一常数 D 。规定 S 为 CCD 上的坐标原点,则对于图 3 中各光斑中心 Q_i , 其在 CCD 上的坐标可以表示为 s_i 。同时观察到辅助线 OS 、各激光反射光线与 CCD 平面在测量平面内构成若干个三角形,称为“光路三角形”,且对于每个三角形,满足:

$$\frac{D}{\sin(\varphi_0 + \varphi_i)} = \frac{s_i}{\sin \theta_i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

结合式(4)整理有:

$$\tan \varphi_i = \frac{D}{s_i \cos \varphi_0} - \tan \varphi_0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

以最左侧光斑中心为起点引出水平辅助线,各光斑在水平线上投影的间距记作 $x_i (i = 1, 2)$ 。由三角形正弦定理可得:

$$\frac{x_1}{\sin(\varphi_0 + \varphi_2)} = \frac{s_2 - s_1}{\sin \varphi_2} \quad (7)$$

$$\frac{x_1 + x_2}{\sin(\varphi_0 + \varphi_3)} = \frac{s_3 - s_1}{\sin \varphi_3} \quad (8)$$

由于透镜与 CCD 之间的相对位置固定,有:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{\tan \theta_3 - \tan \theta_2}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \quad (9)$$

联立式(4)、(7)、(8)、(9)整理得:

$$\frac{\tan \varphi_1 - \tan \varphi_3}{\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2} = \frac{(s_3 - s_1)(\tan \varphi_0 + \tan \varphi_3)}{(s_2 - s_1)(\tan \varphi_0 + \tan \varphi_2)} \quad (10)$$

下文分析 LTMS 外部的数学模型。如图 5 所示,各光路与竖直方向的夹角与图 4 中相同,记作 $\theta_i (i = 1, 2, 3)$ 。在竖直方向上,各光路的反向延长线将位于油膜之下的入射光线分割成若干段,每段长度记作 $z_i (i = 0, 1, 2, 3)$;另一方面,在油膜表面上,各光路的出射点间隔记作 $y_i (i = 1, 2)$ 。

对于图 5 所示模型,各参数满足:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{(z_2 + z_3) \tan \theta_2 - z_3 \tan \theta_3}{(z_1 + z_2 + z_3) \tan \theta_1 - (z_2 + z_3) \tan \theta_2} \quad (11)$$

结合 LTMS 内部的数学模型,根据相似三角形判定定理,易知:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2}{x_1} \quad (12)$$

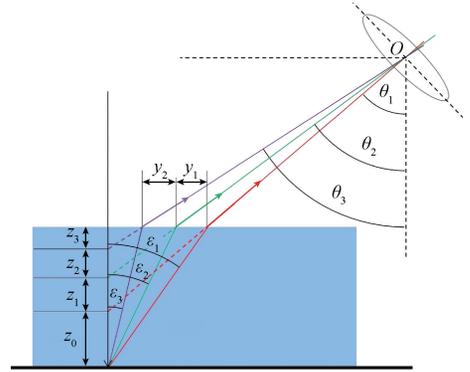


图 5 LTMS 外部的测量模型

Fig. 5 Measurement model outside the LTMS

联立式(4)、(9)、(11)、(12),整理有:

$$(z_1 + z_2) \tan \varphi_2 = z_1 \tan \varphi_3 + z_2 \tan \varphi_1 \quad (13)$$

综上所述,式(6)、(10)与(13)构成了切削液油膜之上各反射光路、LTMS 结构参数与其测值之间的约束关系,其中除 $\varphi_i (i = 1, 2, 3)$ 外,其余参数均可视为已知。采用最小二乘法进行求解,设误差函数:

$$L(\varphi) = |F(\varphi)| + |G(\varphi)| + |H(\varphi)| \quad (14)$$

则使得 $L(\varphi)$ 最小的 $\varphi_i (i = 1, 2, 3)$ 即可视为反射光路与水平面的夹角。式(14)中右侧各项分别对应式(6)、(10)与(13):

$$\begin{cases} F(\varphi) = \sum_{i=1}^3 \left| \tan \varphi_i + \tan \varphi_0 - \frac{D}{s_i \cos \varphi_0} \right| \\ G(\varphi) = \frac{\tan \varphi_1 - \tan \varphi_3}{\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2} \frac{(s_3 - s_1)(\tan \varphi_0 + \tan \varphi_3)}{(s_2 - s_1)(\tan \varphi_0 + \tan \varphi_2)} \\ H(\varphi) = (z_1 + z_2) \tan \varphi_2 - z_1 \tan \varphi_3 - z_2 \tan \varphi_1 \end{cases} \quad (15)$$

设激光照射到被测量面后反射角为 $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3)$, 则对于切削液油膜之下各光路, 满足:

$$\begin{cases} \frac{z_0}{\sin(\theta_1 - \varepsilon_1)} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{\cos \theta_1 \sin \varepsilon_1} \\ \frac{z_0 + z_1}{\sin(\theta_2 - \varepsilon_2)} = \frac{z_2 + z_3}{\cos \theta_2 \sin \varepsilon_2} \\ \frac{z_0 + z_1 + z_2}{\sin(\theta_3 - \varepsilon_3)} = \frac{z_3}{\cos \theta_3 \sin \varepsilon_3} \end{cases} \quad (16)$$

整理式(16)有:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^3 z_i \tan \varphi_1 \tan \varepsilon_1 = z_1 + z_2 + z_3 \\ \sum_{i=0}^3 z_i \tan \varphi_2 \tan \varepsilon_2 = z_2 + z_3 \\ \sum_{i=0}^3 z_i \tan \varphi_3 \tan \varepsilon_3 = z_3 \end{cases} \quad (17)$$

进而有:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\tan \varphi_1 \tan \varepsilon_1 - \tan \varphi_2 \tan \varepsilon_2}{\tan \varphi_2 \tan \varepsilon_2 - \tan \varphi_3 \tan \varepsilon_3} \quad (18)$$

最后引入柯西色散公式的近似表示^[24]:

$$n_i = \frac{\sin \theta_i}{\sin \varepsilon_i} = a + \frac{b}{\lambda_i^2}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (19)$$

将光在空气中折射率近似看作1, 式(19)中 n_i 为各波长激光在油层中的折射率, λ_i 为各激光波长, a, b 为与切削液油膜自身性质相关的系数, 在油膜性质未知的前提下为未知常数。手动调节测量位置, 则油膜以下激光反射角 ε_i 会发生变化, 记作 $\varepsilon'_i (i = 1, 2, 3)$ 。相应地, 油膜以上反射光线与竖直方向的夹角变为 $\theta'_i (i = 1, 2, 3)$ 。由于油膜与所用激光是不变的, 因此在两次测量过程中, 对应激光的折射率相同:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \varepsilon_i} = \frac{\sin \theta'_i}{\sin \varepsilon'_i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

结合式(18)、(19)与(20), 可通过最小二乘法求得反射角 ε_i 。最后代入式(17)求得 z_0 与 z_3 , 则补偿后的测值 M_c 以及油膜厚度 H_{oil} 均可求得, 表示为:

$$\begin{cases} M_c = M_1 + z_0 \\ H_{oil} = \sum_{i=0}^3 z_i \end{cases} \quad (21)$$

其中, M_1 为波长最长的激光所测的测值。

3 仿真分析

3.1 多波长激光测量差分规律的仿真分析

由上述分析可知, 在多波长激光三角测量系统中, 不同波长的激光的折射和反射路径存在一定差异, 主要原因在于切削液油膜介质对光的折射率以及切削液油膜自

身的厚度。为进一步分析多波长激光测量的差分特性与切削液油膜性质之间的规律, 本文借助 MATLAB 软件进行如下仿真分析:

根据实际测量系统的结构尺寸建立相应的数学模型; 如2.2节所述, 选择波长为635、520以及405 nm的激光作为测量光源; 设置与油膜性质有关的参数来模拟切削液附着条件下的激光三角测量。油膜性质主要包括油膜自身厚度及其对光的折射率, 其中切削液油膜厚度可以代数形式表示, 记作 H_{oil} ; 其对光的折射率则参考柯西色散规律, 在已知激光光源波长的前提下, 可由式(19)中的 a, b 两参数确定, 将参数 H_{oil}, a, b 作为变量, 记录不同色光测量值之间的差异 z_1, z_2 。观察结果发现测值差值 z_1, z_2 之比与参数 H_{oil}, a, b 之间存在一定的线性关联, 如图6所示。

从图6中可以看出多波长激光测值的差值 z_1, z_2 之比与折射系数 a 成反比, 与折射系数 b 成正比。参考柯西色散公式, 即式(19)可知, 当 a 增大时, 切削液油膜对各波长激光的折射率均增大, 相当于减小了不同波长光的折射率差异, 而当 b 增大时, 不同波长光的折射率差异也将增大。由此可见, 多波长激光测值的差值之比与切削液对不同波长光折射率的差异呈正相关。此外也观察到, 对于相同的折射系数, 油膜厚度变化1 mm, 激光测值的差值之比仅变化了约 2.3×10^{-3} , 故油膜厚度的变化几乎不会影响 z_1 与 z_2 之比, 但相应的测量误差会增大。由此可见, 多波长激光测量值的差值之比反映了油膜对光的折射特性, 而差值的具体取值则反映了油膜的厚度(如式(17)所示)。

3.2 多波长激光测量误差补偿仿真求解

根据第3节所述流程优化求解, 以实现切削液附着条件下的激光测量误差补偿。观察到最优的折射率与油膜厚度取值并不唯一, 二者呈现线性相关, 如图7所示。

由于单次优化求解所获得的最优解为一条直线, 此时并不能获得最终的误差补偿结果, 因此还需要额外的附加条件。考虑到实际测量过程中与切削液油膜性质有关的参数虽然未知, 但却可视为固定值, 因此本文通过调整传感器在竖直方向的位移来改变系统光路, 采用多次优化求解的方式来寻求公共的最优解, 得到最优的折射系数如图8所示。进而可根据折射系数计算切削液油膜对光的折射率, 再对照图7所示的对应关系, 获取最终的补偿结果。

3.3 激光波长对测量分辨率的影响分析

前述从经验角度出发, 在可见光波段选择了3种不同波长光作为测量光源。为进一步确保测量结果的可靠性及精确性, 针对与切削液油膜性质相关的3个关键参数, 即折射系数 a 、折射系数 b 以及油膜厚度 H_{oil} , 利用

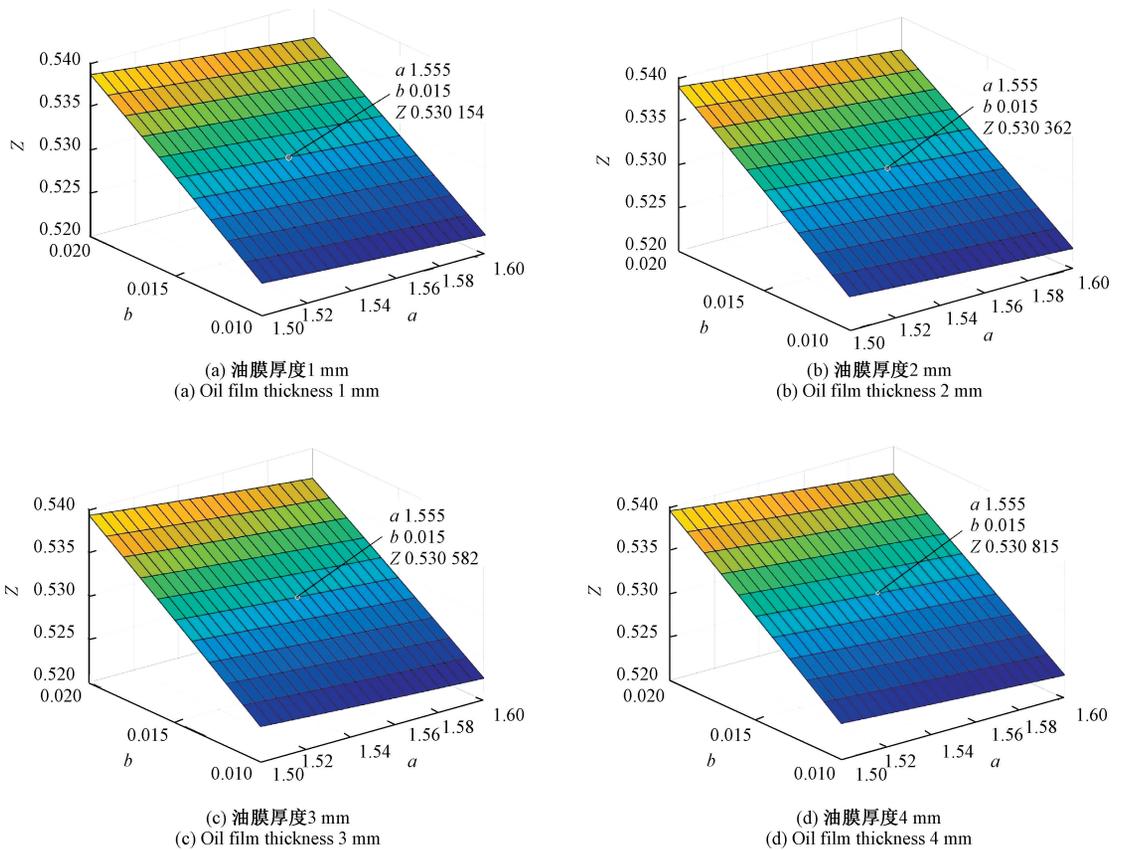


图6 多波长激光测量的差分规律

Fig. 6 Difference regularity of multi wavelength laser measurement

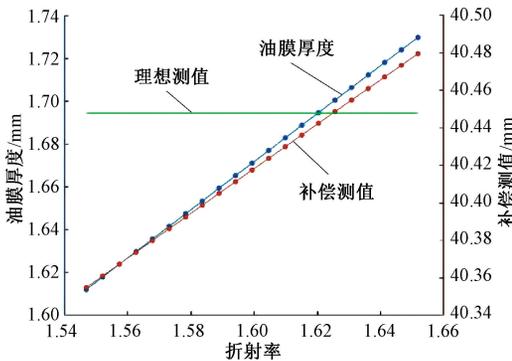


图7 优化求解结果

Fig. 7 Results of optimization solution

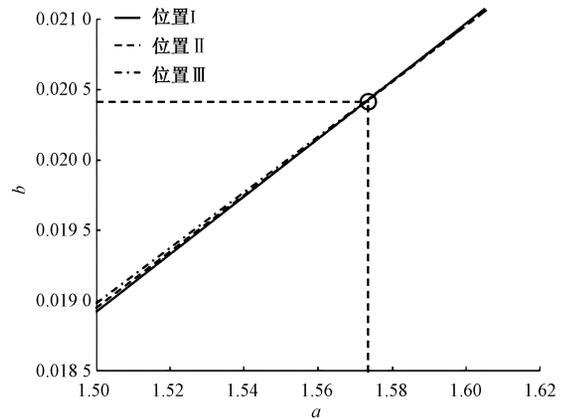


图8 改变测量距离的多次优化求解结果

Fig. 8 Multiple optimization results by changing the measurement distance

控制变量法单独改变上述参数,求得在给定测量位置处采用不同波长光所获的测量结果,图像如图9所示。

为便于观察测值特征,将每组测量结果以最小波长对应的测值为基准对齐,分别如图9(a)~(c)所示,其中图像密度越小,表示油膜性质改变对测值的影响越明显,也就意味着有更高的测量分辨率。由此可见:激光波长越长,测量的分辨率越高;随着折射系数 a 、 b 增大,即折射率增大,分辨率有所下降;油膜厚度改变对各波长激光

的测量分辨率影响不明显。为进一步量化激光波长选择对测量分辨率的影响,图9(d)中将折射系数 a 、 b 以及油膜厚度 H_{oil} 分别设为1.58、0.05、1.50 mm作为参考值(注: a 、 b 为无量纲系数, H_{oil} 单位为mm),与改变参数后的测值进行对比,用参数的变化量除以测值的变化量,可以求得平均的变化量,其含义为产生1 μm 测值差异所

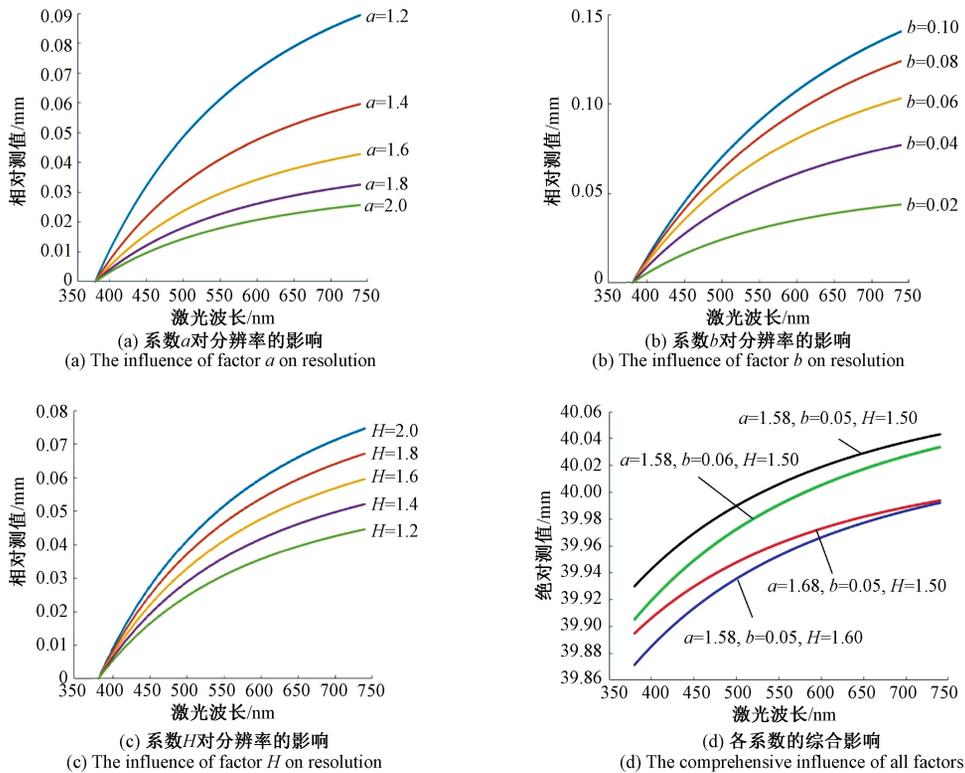


图 9 激光波长与测量分辨率的关系

Fig. 9 Relationship between laser wavelength and measurement resolution

对应的油膜参数改变量。若所用传感器的分辨率可达 $1 \mu\text{m}$, 则各波长激光所能分辨的油膜参数 a, b, H_{oil} 的极限值分别约为 $2.3 \times 10^{-3}, 6.4 \times 10^{-4}, 1.9 \mu\text{m}$, 在可见光范围内所引起的综合测量误差约为 $2.8 \sim 3.6 \mu\text{m}$ 。参考图 9(a)~(c), 本文选取的 635、520 和 405 nm 波长激光能够在 $1 \leq a \leq 1.8$ 和 $0.02 \leq b \leq 0.1$ 区间内实现有效测量, 而切削液厚度不会影响测量结果的有效性。

4 实验与结果

4.1 多波长协作测量实验平台

根据前述测量模型搭建实验平台, 如图 10 所示。其中, 激光光源总计 3 台 (Thorlabs 公司 KLS635、S3FC520、S3FC405), 可分别输出波长为 635、520 以及 405 nm 的激光, 激光由光纤传输至 LTMS, 实验时通过切换光通道实现多波长激光光源在同一位置的测量; LTMS 由课题组独立设计搭建, 量程为 10 mm, 量程起始点距激光出射点 10 mm, 重复精度可达 $1 \mu\text{m}$, 采样频率为 1 kHz; 位移台选用 Zolix NFP-462 型三维微米级位移台。此外, 在装置一侧配置有 API 公司的 XD3LS 型激光干涉仪作为测量基准, 在竖直方向上量程为 4 mm, 精度达 0.5×10^{-6} , 激光干涉仪与反射镜搭配使用, 将反射镜通过相应的连接件与

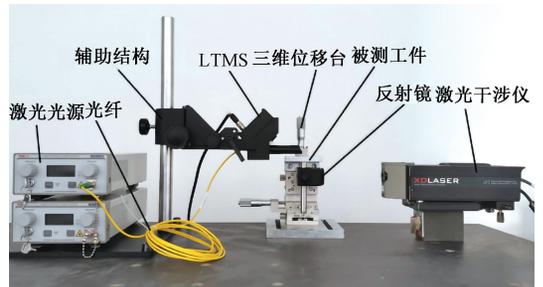


图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

待测工件固联, 即可获取待测工件的位移信息。干涉仪一次安装可以获取被测物的三维坐标信息, 而本实验主要取其在竖直方向上的位移。实验在 20°C 恒温环境下进行, 在整个实验过程中对温度进行实时监控, 温差不超过 0.1°C ; 实验装置安装在平整的大理石工作台上, 其具有刚性好、硬度高、热膨胀系数小等优良特性。因此环境温度、振动等因素对测量结果造成的影响可以忽略不计。实验时, 手动调节各部件位置, 当位移台在竖直方向上处于运动区间中点时, 使 LTMS 与基准传感器的测量值均处于各自量程的中点。利用水平仪调节被测面与传感器的顶面水平。

4.2 无切削液附着条件下的测量系统标定

为确保实验数据的有效性,在实际测量前,需要标定测量系统。具体为,将基准传感器的示数视为真实值,将 LTMS 的示数作为测量值,基于激光三角测量原理,在有效量程内,二者呈现线性相关。在无切削液附着的理想测量

条件下,采集基准传感器与 LTMS 的测量值,在基准传感器量程中点 ± 1.5 mm 范围内,每间隔 0.1 mm 采集一次测量数据,记录测量数据并线性拟合,如图 11 所示。其中,横坐标表示 LTMS 的示数,纵坐标表示基准传感器的示数,图 11 中的测量点为实际测量数据,并将各测量点拟合为直线。

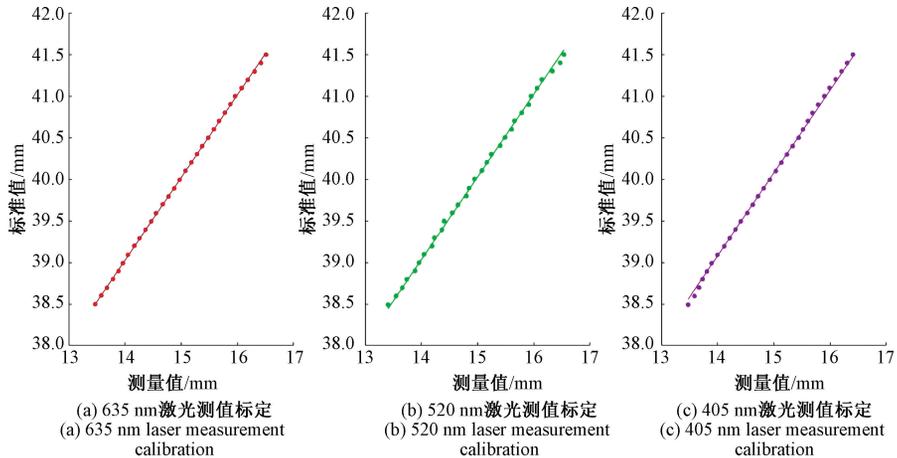


图 11 无切削液附着条件下多波长激光测量数据对比

Fig. 11 Comparison of multi wavelength measurement data without cutting fluid adhesion

从图 11 中观察到,LTMS 与基准传感器示数之间呈良好的线性相关。同时,即使在没有切削液附着的理想测量条件下,使用不同波长光源的测量值仍存在一定差异,其主要原因在于 LTMS 内部的聚焦透镜对不同波长的汇聚程度不同。考虑到所用激光光源的波长为 LTMS 固有参数,因此实验中可以分别标定三色激光的测量值,再将测量数据集转换至同一基准,以消除对后续算法的影响。

实验标定后的系统参数分别为: $k_r \approx 0.995$, $b_r \approx 25.098$, $k_G \approx 0.980$, $b_G \approx 25.331$, $k_p \approx 1.020$, $b_p \approx 24.788$,其中 k 、 b 分别表示拟合直线的斜率和截距,下角标 R、G、P 分别对应波长 635、520、405 nm 的激光。

4.3 切削液附着条件下的多波长协作测量

使用专用工具在被测位置滴加液滴,进行切削液附着表面的测量实验。为验证方法对不同介质的适用性,本文以清水、切削液、清洗液 3 种不同介质为例分别进行了实验。

首先针对不同介质不同厚度油膜进行实验,在无(0 mm)、较薄(0~1 mm)、中等(1~2 mm)、较厚(>2 mm)油膜 4 种条件下,观察不同油膜厚度对激光测量的影响,记录激光测量值与不同油膜厚度之间的关系如图 12 所示。

将无油膜附着时的测值视为标准值,则可以明显观察到当存在油膜附着时,测量值相比于标准值偏小,随着油膜厚度的增加,测量误差也随之增大,且不同类型的油膜均具有相似的性质,这一点与前述理论分析相符。

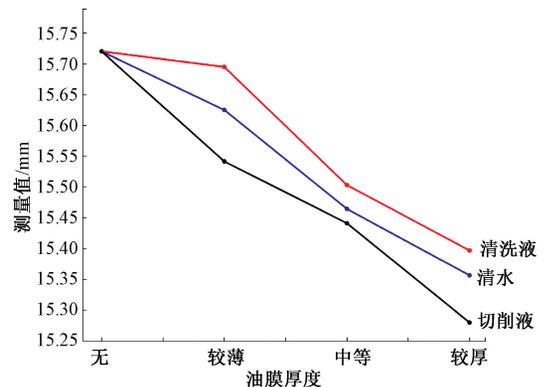


图 12 不同厚度油膜对激光测量的影响

Fig. 12 Influence of oil film with different thickness on laser measurement

进一步地,进行不同性质油膜附着条件下的多波长激光协同测量实验,记录基准传感器的标准值及使用不同波长激光时测量系统的测量值,分别如表 1~3 所示,所记录的每组测量数据由 3 个测值组成,分别对应于波长为 635、520、405 nm 激光所测结果。从表 1~3 中可以看出,当被测工件表面残留切削液时,使用任何单一波长激光光源的测量结果均存在较大的测量误差。对同一位置使用不同波长的激光光源进行测量,观察到激光波长越长,其测量值越接近标准值,其主要原因在于激光波长越长,在同一介质中的折射率越小,因此受表面切削液残留的影响也越小。考虑到波长最长的激光(红光,

635 nm) 所获测值最接近真实值,将补偿后的测量结果与红光测值进行对比,计算补偿后的测量误差以及误差下降百分比。其中误差下降百分比记作 E_p ,是指补偿后测量误差的减小量与补偿前的测量误差的绝对值之比,具体计算方法如下:

$$E_p = \left(1 - \left| \frac{M_c - M_s}{M_1 - M_s} \right| \right) \times 100\% \quad (22)$$

其中, M_s 、 M_1 、 M_c 分别表示标准值、波长 635 nm 激光的测量值以及补偿后的测量值。

表 1 工件表面附着清水的实验结果

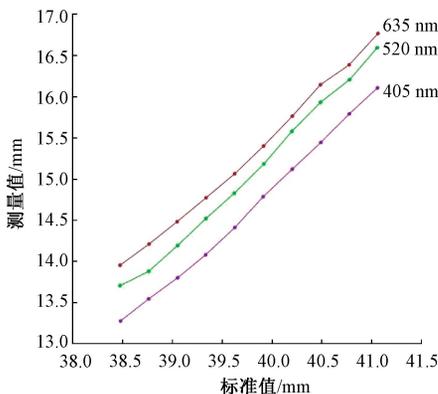
Table 1 Experimental results with clean water attached to the workpiece surface

标准值/ mm	补偿前测值/mm			补偿后测 值/mm	测量误 差/mm	误差下降 百分比/%
	635 nm	520 nm	405 nm			
39.899	39.641	39.629	39.608	39.892	-0.007	97.29
40.105	39.847	39.835	39.814	40.098	-0.007	97.29
40.301	40.043	40.031	40.010	40.293	-0.008	96.90
40.503	40.245	40.233	40.212	40.495	-0.008	96.90
40.708	40.450	40.438	40.417	40.699	-0.009	96.51
40.905	40.647	40.635	40.614	40.895	-0.010	96.12

表 2 工件表面附着切削液的实验结果

Table 2 Experimental results with cutting fluid attached to the workpiece surface

标准值/ mm	补偿前测值/mm			补偿后测 值/mm	测量误 差/mm	误差下降 百分比/%
	635 nm	520 nm	405 nm			
39.899	39.718	39.706	39.688	39.892	-0.007	96.13
40.101	39.920	39.908	39.890	40.094	-0.007	96.13
40.303	40.122	40.110	40.092	40.296	-0.007	96.13
40.502	40.321	40.309	40.291	40.494	-0.008	95.58
40.703	40.522	40.510	40.492	40.695	-0.008	95.58
40.904	40.723	40.711	40.693	40.896	-0.008	95.58



(a) 表面不含杂质
(a) Surface free of impurities

表 3 工件表面附着清洗液的实验结果

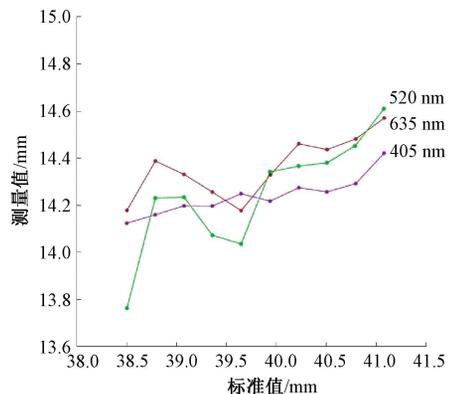
Table 3 Experimental results with cleaning fluid attached to the workpiece surface

标准值/ mm	补偿前测值/mm			补偿后测 值/mm	测量误 差/mm	误差下降 百分比/%
	635 nm	520 nm	405 nm			
39.896	39.784	39.776	39.760	39.904	0.008	92.86
40.107	39.995	39.987	39.971	40.115	0.008	92.86
40.303	40.191	40.183	40.167	40.310	0.007	93.75
40.503	40.391	40.383	40.367	40.510	0.007	93.75
40.708	40.596	40.588	40.572	40.715	0.007	93.75
40.907	40.795	40.787	40.771	40.913	0.006	94.64

上述实验数据表明,对于不同类型的附着油膜,经过算法补偿后的测量误差绝对值均低于 0.01 mm。相较于补偿前,对于附着清水、切削液以及清洗液的测量误差分别降低了 96%、95% 以及 92% 以上。由此可以看出本文方法对不同厚度、不同类型油膜附着条件下的激光测量误差均具有较好的补偿效果,表明了本文方法具有良好的普适性,显著提高了表面切削液残留条件下的激光位移测量精度。

为进一步提高本方法在在机测量过程中的实用性,考虑到实际加工时,工件表面残留的切削液中可能混有切屑、灰尘等杂质,本文将不同尺寸的杂质颗粒混入切削液中,进行了多波长协作测量实验。测量结果对比如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,当切削液中含有杂质颗粒时,测量结果出现明显异常,且杂质颗粒越大,对测量结果的影响也越大,但一些局部的测量数据也存在一定的差分规律。由此可见,当杂质与切削液相容良好时,相当于改变了切削液对光的折射率,不会对测量产生影响,而当产生较大杂质沉淀时,激光传播路径将受到严重影响,使得测量失效。针对这一问题,在实际的生产过程中,可在测量前利用清洗液对工件表面进行冲洗,以避免杂质残留,而残留的清洗液则可以利用本文方法,实现激光测量误差补偿。



(b) 含较小杂质
(b) Containing smaller impurities

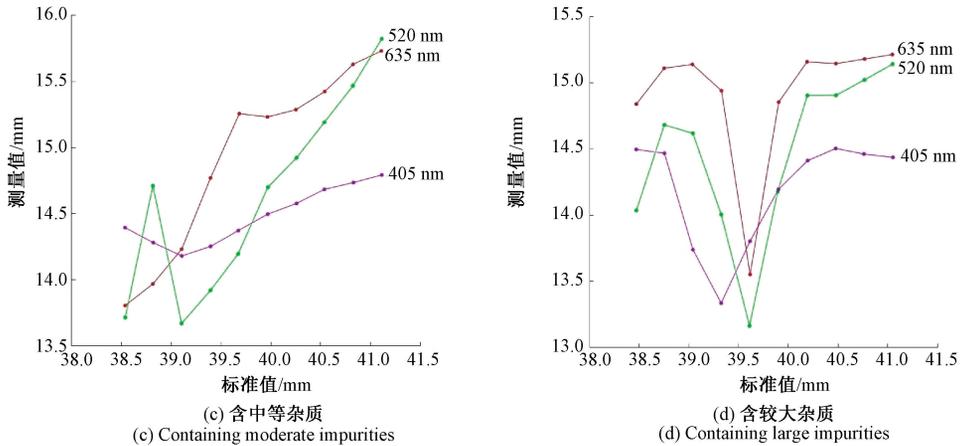


图13 含杂质的测量结果对比

Fig. 13 Comparison of measurement results with impurities

5 结 论

本文针对在机测量过程中由切削液残留导致的激光测量误差问题,提出了基于多波长协作的激光三角误差补偿算法,该方法以柯西色散规律为纽带,建立起系统光路与光源波长之间的解析关系,进而推导出多波长协作测量的差分特性以及求解方法,并进行了实验验证。实验结果证实了切削液残留对激光测距存在较大影响,而采用本文算法对测量结果进行补偿后,测量精度得到显著提高。相比于采用单一激光三角传感器的误差补偿方法,本文方法无需借助额外的检测设备来获取切削液成分、厚度等先验信息,可以自适应地对测量结果进行补偿,既降低了系统复杂度,又提高了在机测量效率。

参考文献

- [1] 董祉序,孙兴伟,刘伟军,等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 30-38.
DONG ZH X, SUN X W, LIU W J, et al. Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 30-38.
- [2] 李茂月,马康盛,王飞,等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 55-66.
LI M Y, MA K SH, WANG F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud based on

structured light on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 55-66.

- [3] 周晏锋,陈蔚芳,曹新航,等. 基于线激光在机测量的一面两孔特征寻位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0112004.
ZHOU Y F, CHEN W F, CAO X H, et al. One-plane two-hole feature positioning method based on line laser on-machine measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0112004.
- [4] 董必辉. 金属切削液的选用分析与解决策略[J]. 内燃机与配件, 2021(7): 106-108.
DONG B H. Analysis and solution strategy of metal cutting fluid selection [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(7): 106-108.
- [5] 郑文清,杨风. 浅谈金属加工中切削液的重要作用[J]. 装备制造技术, 2016(7): 109-111.
ZHENG W Q, YANG F. Simple analysis of the important role of cutting fluid in metal processing [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(7): 109-111.
- [6] WU C X, CHEN B J, YE C S, et al. Modeling the influence of oil film, position and orientation parameters on the accuracy of a laser triangulation probe [J]. Sensors, 2019, 19(8), 1844.
- [7] 蔡宗歧,冯巍巍,王传远. 基于激光拉曼光谱的水面油膜厚度测量方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(6): 1661-1664.
CAI Z Q, FENG W W, WANG CH Y. The study of oil film thickness measurement on water surface based on

- laser raman spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(6): 1661-1664.
- [8] 崔永强, 孔德明, 孔令富, 等. 一种基于波段比值法的海面厚油膜评估方法[J]. *计量学报*, 2020, 41(11): 1327-1331.
- CUI Y Q, KONG D M, KONG L F, et al. An evaluation method for thick oil film on sea surface based on band ratio method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(11): 1327-1331.
- [9] 崔永强, 孔德明, 张晓丹, 等. 一种基于荧光信号的海面厚油膜评估方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(1): 150-155.
- CUI Y Q, KONG D M, ZHANG X D, et al. A method for estimating thick oil film on sea surface based on fluorescence signal [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 150-155.
- [10] 陈博雯, 黄健, 张征宇. 模型姿态变化对荧光油膜测厚精度的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 146-152.
- CHEN B W, HUANG J, ZHANG ZH Y. Influence of model pose change on accuracy of fluorescence oil film thickness measurement[J]. *Acta Optical Sinica*, 2021, 41(23): 146-152.
- [11] SALEH M, OUEIDAT G, GHAMLOUCH M, et al. LED-based spectrometer for in situ oil slick thickness measurement [C]. 2018 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET), IEEE, 2018: 14-16.
- [12] 杨桂栓, 陈涛, 张志峰. 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708004.
- YANG G SH, CHEN T, ZHANG ZH F. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0708004.
- [13] 刘凯媚, 陶卫, 陈潇, 等. 可自适应位移变化的玻璃厚度激光三角测量方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104003.
- LIU K M, TAO W, CHEN X, et al. Laser triangulation method for glass thickness by automatically adapting to displacement change [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104003.
- [14] 李春艳, 李庚鹏, 刘继红, 等. 基于GRNN的光谱共焦位移测量方法分析与研究[J]. *光子学报*, 2022, 51(3): 346-354.
- LI CH Y, LI G P, LIU J H, et al. Analysis and research on spectral confocal displacement measurement method based on GRNN [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(3): 346-354.
- [15] 周旻超, 王振亚, 王弼陡, 等. 激光扫描共聚焦光谱系统设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(3): 237-245.
- ZHOU M CH, WANG ZH Y, WANG B D, et al. Design of laser scanning confocal spectroscopy system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(3): 237-245.
- [16] BAI J, LI J W, WANG X H, et al. A new method to measure spectral reflectance and film thickness using a modified chromatic confocal sensor [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 154: 107019.
- [17] 张雅丽, 余卿, 程方, 等. 光纤束并行彩色共聚焦测量系统及实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 23-31.
- ZHANG Y L, YU Q, CHENG F, et al. Parallel chromatic confocal measurement system based on optical fiber bundle and its experimental study [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 23-31.
- [18] 邹景武, 余卿, 程方. 差动式彩色共聚焦粗糙度评定系统及实验研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1103-1114.
- ZOU J W, YU Q, CHENG F. Differential chromatic confocal roughness evaluation system and experimental research [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1103-1114.
- [19] YU Q, ZHANG Y L, SHANG W J, et al. Thickness measurement for glass slides based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination [J]. *Photonics*, 2021, 8(5): 170.
- [20] 汪石农, 程志军, 任超洋, 等. 一种双臂激光测距系统设计和误差分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(10): 18-25.
- WANG SH N, CHENG ZH J, REN CH Y, et al. Design

and error analysis of a two-arm laser ranging system[J].

Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 18-25.

- [21] LILLOTTE T D, BEBERNIK P, KECK J, et al. Laser triangulation as a fast and reliable method for determining ribbon solid fraction; focus on accuracy, precision, and measurement time [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 610: 121241.
- [22] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 1-8.
WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting end error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 1-8.
- [23] LI X Q, WANG ZH, FU L H. A high-speed in situ measuring method for inner dimension inspection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(1): 104-112.
- [24] 薛常喜, 崔庆丰, 杨亮亮, 等. 基于柯西色散公式的多层衍射光学元件的设计和分析[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0623002.
XUE CH X, CUI Q F, YANG L L, et al. Design and analysis of multi-layer diffractive optical elements with cauchy dispersion formula [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0623002.

作者简介



陈旭辉, 2020年于东北农业大学获得学士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所在读硕士研究生, 主要研究方向为精密测量技术。

E-mail: chenxuhui@sia.cn

Chen Xuhui received his B.Sc. degree from Northeast Agricultural University in 2020. He is currently a master student at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is precision measurement technology.



李兴强(通信作者), 2012年于辽宁大学获得学士学位, 2017年于天津大学获得博士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所副研究员, 主要研究方向为激光/视觉精密测量技术研究、精密测试技术及智能仪器、先进制造与装备集成。

E-mail: lixingqiang@sia.cn

Li Xingqiang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Liaoning University in 2012, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2017. He is currently an associate researcher at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include laser/vision precision measurement, precision testing technology and intelligent instruments, and advanced manufacturing and equipment integration.